

磁流变液的制备及其剪切屈服应力研究

肖林京, 公绪波, 朱绪力, 赤玉荣

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为研究磁流变液成链过程及剪切应力影响因素,以羰基铁粉为铁磁性颗粒、二甲基硅油为基载液制备磁流变液,并对其成链过程进行显微观察,采用流变仪对制备磁流变液进行剪切应力测试。结果表明:磁流变液的剪切应力随着剪切速率、体积比、磁场强度的增大而增大,且当剪切速率增大 200 倍时,剪切应力仅增加 12.6%;剪切应力与体积比趋于线性关系;当磁场强度增加到一定值时,剪切屈服应力将趋于稳定。

关键词:磁流变液;剪切应力;剪切速率;体积比;磁场强度

中图分类号:TB383.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2016)02-0101-04

Preparation of Magnetic-rheological Fluid and Its Shear Yield Stress

XIAO Linjing, GONG Xubo, ZHU Xuli, CHI Yurong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the chain-forming process of magnetic-rheological fluid (MRF) and the influence factors of its shear stress, microscopic observations were made to the magnetic-rheological fluid prepared with carbonyl iron powders as ferromagnetic particles and dimethyl silicon oil as carrier fluid and shear stress tests were carried out by using Rheometer Physica MCR 301. The results indicate that the shear stress increases significantly with the increase of shear rate, volume ratio and magnetic field strength. When the shear rate increases by 200 times, the shear stress only rises 12.6%, and shear stress and volume ratio tends to be linear. When the excitation current increases to a certain value, the shear yield stress tends to be stable.

Key words: magnetic-rheological fluid; shear stress; shear rate; volume ratio; magnetic field intensity

磁流变液是由微米量级的铁磁性颗粒分布于载液中形成的悬浮液,可控性好、响应速度快。铁磁性颗粒能在毫秒级内迅速集结成链,使液体的表观粘度产生多个数量级的增加。与磁流变液(magnetic-rheological fluid, MRF)结构相似的纳米磁流体也是一种具有随外加磁场而有可控流变特性的特殊智能材料,因其具有不沉淀、不凝聚的特点,使得纳米磁流体在机械、医疗、密封等领域有着广泛应用^[1]。与纳米磁流体相比, MRF 具有制备简单、成本低、剪切应力大的优点,以 MRF 为介质的传动及制动产品已应用到汽车、机械、航空航天、建筑等行业中,作为一种新型智能材料,磁流变液及相关应用技术将对现代工业的发展产生巨大影响^[2-3]。

1 MRF 的组成及制备

1.1 组成及作用

磁流变液由微米级铁磁性颗粒、基载液和防止颗粒沉降的添加剂组成,铁磁性颗粒一般为磁导率较高的

收稿日期:2015-12-05

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011EEM005);山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150321)

作者简介:肖林京(1966—),山东沂水人,教授,博士生导师,主要从事机电一体化系统设计等方面的研究。

E-mail:skdjdx@163.com

导磁材料,其材质是剪切屈服应力的决定性因素,常用的铁磁性颗粒有铁、钴、镍的氧/氮化物和各种导磁的合金材料,其选取应综合考虑性能、价格、制备难易程度等因素,本研究选取最常用的羰基铁粉作为实验用铁磁性颗粒^[4]。基载液是铁磁性颗粒载体,分为磁性基载液和非磁性基载液,基载液除应具有良好的氧化和温度稳定性外,还应具有密度高、无污染、价格低、粘度适宜、非易燃等特点^[5],常用的基载液有硅油、合成油、水等。添加剂为附着在铁磁性颗粒表面的分子层,添加剂可有效阻止磁流变液的沉降,确保铁磁性颗粒的悬浮稳定性并提高磁流变液的流变性能。

1.2 制备工艺

与纳米磁流体相比,MRf 的制备工艺简单,材料成本低,但其具有沉降性,且沉淀与再分散能力是评价 MRf 的一个重要指标。选用传统分散制备法对 MRf 进行制备^[6],制备工艺流程图如图 1 所示。采用自然沉降观察方法对制备后的磁流变液样品稳定性进行测试^[7],经过 15 天的静置观察与测量,发现所配置的磁流变液沉降率为 10%,且无板结现象,实验样品合格,满足实验要求。

1.3 MRf 磁流变效应的宏观与微观观察

MRf 可表现出良好的磁流变效应,即在外加磁场时表现自由流动状态,具有牛顿流体特性;施加磁场后,铁磁性颗粒被磁化,瞬间由自由流动状态变为类固体状态。如图 2 所示,在外加磁场强度等于 0 时,软磁性颗粒均匀分布于基载液中;当施加中等强度磁场时,磁流变液迅速聚集成链;继续增大磁场强度,颗粒链继续聚集,形成高于液面的锥状凸起,此时的 MRf 呈现半固态状,具有较大剪切屈服应力,该变化过程可逆可控^[8]。

为观察 MRf 磁流变效应的微观表现形式,应用图 3 所示的超景深三维高速显微镜观察配置好的 MRf,其颗粒在外加磁场下的运动成链过程如图 4 所示。在无外加磁场时,羰基铁粉颗粒呈现不规则分布,分散于基载液中并缓慢流动如图 4(a)所示;施加磁场 15 s 后,颗粒迅速沿磁场方向聚集成链,颗粒链排序规则且呈现静止不动的状态,如图 4(b)所示;撤除磁场 15 s 后,颗粒在剩磁的作用下相互吸引并随基载液流动,如图 4(c)所示。

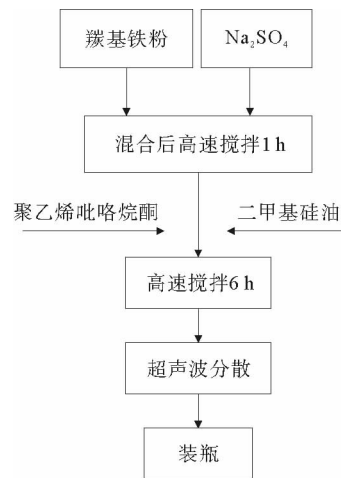


图 1 MRf 制备工艺流程图

Fig. 1 Preparation process of the MRf

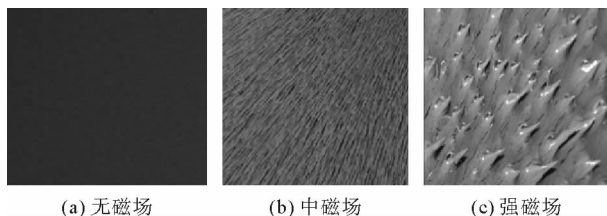


图 2 MRf 流变效应宏观表现形式

Fig. 2 Macro-phenomena of magneto-rheological effect



图 3 超景深三维高速显微系统图

Fig. 3 The fig of 3D high speed microscope system

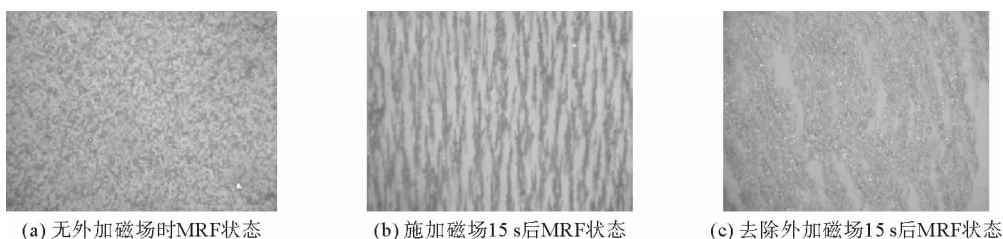


图 4 MRf 运动成链过程电镜图(放大 500 倍)

Fig. 4 The chain-forming process of MRf(Enlarge 500 times)

2 MRF 颗粒受力分析

磁流变液在外加磁场作用下迅速集结成链,是因为铁磁性颗粒受力相互吸引,磁流变液的铁磁性颗粒为微米级,被磁化后可看成是一个个很小的磁偶极子,在无外加磁场时,磁偶极子的磁矩方向是杂乱无章、相互抵消的。此时,磁流变液的磁矩表现为零,施加一定的磁场强度后,偶极子被磁化,沿外加磁场方向排列,基于参考文献[9]所述的强化偶极子模型,当颗粒受到剪切方向的单位矢量力 i 时,则颗粒在此方向上的力 T_i 为:

$$T_i = F_i \cdot i = \left[\frac{4\pi\mu_0\chi^2 H^2 R^6}{3r_{ij}^4} \right] \cdot \left[(1-5\cos^2\theta_j) - \frac{\chi R^3}{3r_{ij}} (1+4\cos^2\theta_j) \right] \sin\theta. \quad (1)$$

其中: F_i , r_{ij} 分别为两偶极子间的吸引力和相对距离; μ_0 为真空磁导率; H 为磁场强度; χ , R 分别表示颗粒的磁化率和直径; θ 为颗粒间的球心连线与外磁场方向的夹角。从式(1)可看出, MRF 的剪切屈服应力与颗粒的直径、磁导率、外加磁场强度、颗粒间距等因素有关。

3 分析与讨论

MRF 在外加磁场的作用下将沿磁场方向集结成链状结构,在颗粒链上施加一定的垂直于磁场方向的力,颗粒链将被切断,这种由于颗粒链断裂而产生的力称为磁流变液的剪切屈服应力。剪切屈服应力是 MRF 重要的性能评价指标之一,研制高剪切应力的磁流变液已成为众多研究者的努力方向。

由颗粒受力分析可知, MRF 剪切屈服应力与颗粒直径、磁导率、外加磁场强度、颗粒间距等因素有关,从剪切速率、磁场强度、体积比三个方面应用图 5 所示的 Rheometer Physica MCR 301 流变仪对磁流变液剪切屈服应力的影响进行了实验研究。

1) 对试样 A (MRF 的体积比为 30%, 粘度为 $10 \text{ mm}^2/\text{s}$) 施加 3 A 的励磁电流,进行不同剪切速率下 MRF 剪切应力实验,测量结果如图 6 所示。剪切速率为 0 时, MRF 的剪切屈服应力值为 10.41 KPa,要使磁流变液产生剪切流动,剪切应力必须大于该值;剪切速率由 0 增加 5 s^{-1} 时, MRF 剪切应力随剪切速率的增大而增大,迅速增加到 36.3 kPa;当剪切速率继续增大时, MRF 的剪切屈服应力继续随剪切速率的增大而增大,但增速缓慢,发生剪切变稀现象,当剪切速率从 5 s^{-1} 增加为 1000 s^{-1} 时,剪切屈服应力值仅增大 12.6%。

2) 由于励磁电流的大小决定外加磁场大小,故通过励磁电流与剪切应力关系即可看出外加磁场强度与剪切屈服应力的关系。图 7 为试样 B (体积比为 30%, 粘度为 $10 \text{ mm}^2/\text{s}$) 在剪切速率为 500 s^{-1} 时的励磁电流与剪切屈服应力关系曲线,可以看出,电流从 0 增加到 2 A 时,剪切应力迅速增加,但当电流继续增加到 4 A 过程中,曲线趋近平缓,表明剪切屈服应力增速放缓。因为随着电流增加,外加磁场强度增大,铁磁性颗粒逐渐被磁化,颗



图 5 MCR301 流变仪

Fig. 5 Rheometer Physica MCR 301

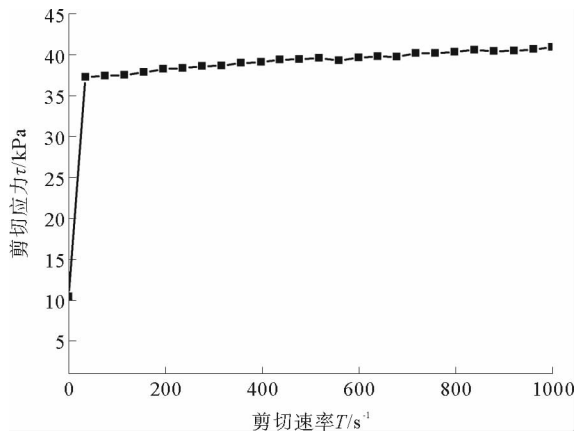


图 6 剪切速率-剪切应力曲线

Fig. 6 The curve of shear rate and shear stress

粒相互吸引聚集成链,液体剪切屈服应力增大,但当磁场强度进一步增大时,颗粒磁化逐渐趋于饱和,颗粒间的吸引力不再随着磁场强度增大而增大,剪切屈服应力曲线趋于平缓,最终稳定于某一定值。

3)图 8 表示了剪切速率为 $1\ 000\ s^{-1}$,通电电流为 3 A 时,磁流变液体积比与剪切屈服应力关系。由图可看出,体积比对磁流变液剪切屈服应力影响明显,随着体积比的增大,剪切应力也相应增大,且趋于线性关系,因为随着 MRF 体积比增大,分散于基载液的磁性颗粒数目增加,颗粒间距减小,铁磁性颗粒间的吸引力增大,磁流变液的粘度和阻力增加,磁流变液的剪切屈服应力随之增大。

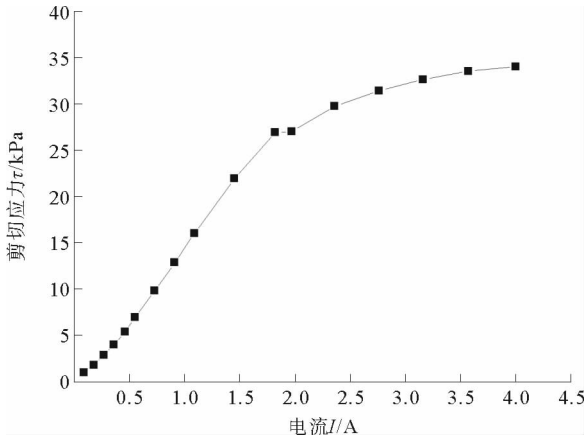


图 7 外加电流-剪切应力曲线

Fig. 7 The curve of current-shear stress

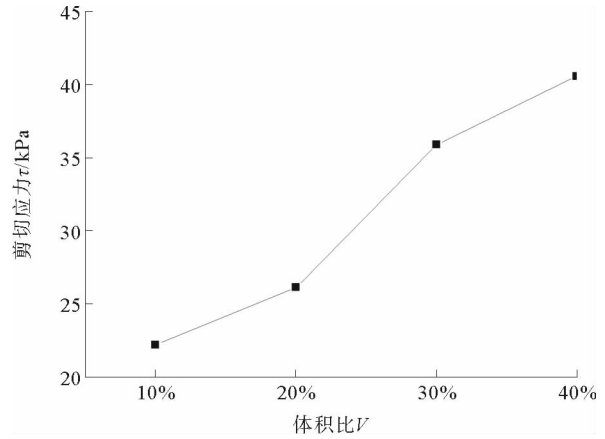


图 8 体积比-剪切应力曲线

Fig. 8 The curve of volume ratio-shear stress

4 结论

1)通过 MRF 磁流变效应的宏观和微观观察发现,施加磁场后,MRF 颗粒沿磁场方向迅速聚集成链,继续增大磁场强度,MRF 由自由流动状态变成类固态,剪切屈服应力也迅速增加。

2)MRF 的剪切应力随着剪切速率、体积比、磁场强度的增大而增大。当开始剪切时,MRF 剪切应力迅速增加;继续增大剪切速率时,剪切应力增速放缓,此时当剪切速率增大 200 倍时,剪切应力仅增加 12.6%。MRF 的剪切应力正比于其体积比,且当励磁电流增加到一定值时,剪切屈服应力将趋于稳定。

参考文献:

- [1]叶荣昌,刘书进,高宏,等.磁流体制备技术的研究现状及其存在问题[J].机械工程材料,2003,27(3):33-34.
YE Rongchang,LIU Shujin,GAO Hong,et al. Development and problems of the preparation of magnetic fluids[J]. Materials for Mechanical Engineering,2003,27(3):33-34.
- [2]SPENCER B F,NAGARAJIAH S. State of the art of structural control [J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(7):845-856.
- [3]禹见达,陈政清,王修勇. MR 阻尼器对拉索振动控制的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2007,26(2):37-39.
YU Jianda,CHEN Zhengqing,WANG Xiuyong. Study on control of inclined cable vibration with magnetorheologic dampers [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2007,26(2):37-39.
- [4]姚军,张进秋,彭志召,等. 羰基铁粉的铁含量和粒径对磁流变液剪切屈服强度的影响[J]. 材料研究学报,2014,28(12):24-28.
YAO Jun,ZHANG Jinqiu,PENG Zhizhao,et al. Influence of Fe content and particle size of carbonyl iron powder on shear yield stress of magnetorheological fluids [J]. Chinese Journal of Materials Research,2014,28(12):24-28.
- [5]程海斌. 磁流变液的稳定性调控及其在重大工程中应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [6]江万权,朱红,龚兴龙. 一种稳定型磁流变液:CN101457172[P]. 2009-06-17.
- [7]吴继荣,李晓琦,李学慧,等. 磁流变液的制备及其表面张力系数的实验研究[J]. 微纳电子技术,2014,51(3):146-150.
WU Jirong,LI Xiaoqi,LI Xuehui,et al. Preparation of the magnetorheological fluid and experimental study on its surface tension coefficient[J]. Micronano-electronic Technology. 2014,51(3):145-150.
- [8]田组织. 磁流变液及其传动技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2012.
- [9]赵春伟. 基于微结构的磁流变液力学性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

(责任编辑:李 磊)